

УДК 539.3

**Экспериментально-теоретические исследования дисперсно-
упрочненных композитов применительно к задачам
аэрокосмической промышленности**

Ершова А.Ю.*, Мартиросов М.И.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: Yershova_A@mail.ru*

Аннотация

Композиционные конструкции внедряются в аэрокосмическую промышленность очень высокими темпами, начиная от небольших второстепенных деталей и заканчивая самыми важными системами. Эта тенденция связана в первую очередь с возможностями, которые открывает использование новых материалов, применение которых в аэрокосмической промышленности невозможно без значительного объема научно-исследовательских работ по изучению механических свойств этих материалов. В статье представлено экспериментальное изучение механических свойств нового вида зернистых композитов – литьевого искусственного камня (ЛИК), а именно, выбор оборудования для проведения эксперимента, разработка методики и проведение экспериментов по определению механических характеристик данного материала. Разработана методика определения параметров определяющих соотношений, принятых для описания установленной зависимости упругих характеристик от вида напряженного состояния.

В настоящее время данный материал используется в авиации и космонавтике, как легкий и нерадиоактивный отделочный материал.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, упругие характеристики материала, полимерные композиционные материалы, зернистые композиты, литевой искусственный камень.

1. Введение

В настоящее время большое распространение в различных областях современной техники получили полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают характеристиками, выгодно отличающимися от традиционных конструкционных материалов. Такие материалы открывают широкие возможности как для совершенствования уже существующих конструкций, так и для разработки новых. Кроме того, технологические процессы формования изделий из ПКМ обладают существенно меньшей энергоемкостью по сравнению с технологиями обработки распространенных металлических материалов [1]. Благодаря своим свойствам и механическим характеристикам одним из наиболее интересных и перспективных видов ПКМ является литевой искусственный камень (ЛИК), который представляет собой конструкционный композиционный материал, основными компонентами которого являются ненасыщенная полиэфирная смола и инертный зернистый наполнитель [2].

В зависимости от используемой смолы, наполнителя и красящих пигментов можно имитировать цвет и фактуру натурального природного камня: мрамора,

малахита, змеевика, оникса, гранита, яшмы и т.д. При этом сохраняется высокая несущая способность изделия. ЛИК обладает рядом преимуществ по сравнению с натуральным камнем, в частности, ЛИК превосходит его по механическим характеристикам. Этот материал имеет низкую теплопроводность, высокое шумопоглощение, характеризуется отсутствием радиоактивного фона, присущего природному камню. Литьевая технология позволяет легко изготавливать изделия любой сложности, в которых сохраняются природные качества и внешний вид натурального камня [3,4].

В каждом конкретном случае замена традиционных материалов на композиты должна сопровождаться значительным объемом научно-исследовательских работ, связанных с изучением особенностей физико-механических свойств ПКМ и разработкой методов оценки их эксплуатационных характеристик. В связи с этим изучение зернистых композитов на основе ненасыщенных полиэфиров требует отдельного исследования, разработки методик проведения экспериментов по определению механических характеристик и свойств, подбора соответствующих определяющих соотношений, описывающих особенности механического поведения материала.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Особенностью механических свойств литьевого искусственного камня, как и натурального, являются малый уровень деформаций (0,5% при сжатии и 0,05% при растяжении). Точное определение характеристик подобных материалов возможно лишь при использовании современного оборудования и методов испытаний.

В данной работе свойства ЛИК определены по результатам испытаний образцов материала на универсальной испытательной машине ZWICK Z100, производства Германии. Эта испытательная машина предназначена для измерений силы и деформации в процессе испытания конструкционных материалов на растяжение и сжатие. Использование простого приспособления позволяет проводить на машине испытания на изгиб. Испытываемый образец устанавливается в захватах между подвижной и неподвижной траверсами. Нагружение образца осуществляется за счет перемещения активного захвата в заданном режиме. В процессе испытания возможно реализовать режимы нагружения образца с постоянной скоростью изменения напряжений, силы, перемещения активного захвата или деформации. Измеряемые параметры (силы и перемещение) преобразуются датчиками и блоком управления машины в электрические сигналы, которые отображаются на экране монитора управляющего компьютера в соответствующие диаграммы растяжения или сжатия.

В предлагаемой работе установка использовалась для проведения испытаний образцов ЛИК на растяжение, сжатие и изгиб при монотонных режимах нагружения. По результатам испытаний были определены предел прочности, модуль упругости и вязкость разрушения материала. Для определения коэффициента Пуассона были проведены дополнительные эксперименты на растяжение и сжатие с использованием тензометрического метода измерения продольной и поперечной деформации. Для нагружения использовалась универсальная испытательная машина ZWICK Z100, для измерения продольной и

поперечной деформации - цифровой тензоусилитель типа Spider-8, фирмы «Хоттингер», производства Германии и персональный компьютер. Для определения вязкости разрушения использовалось простое приспособление, позволяющее проводить испытания на трехточечный изгиб образцов-брусков с надрезами. В процессе испытания получены экспериментальные диаграммы сила-прогиб, которые использовались для идентификации необходимой зависимости податливости бруса (образца) от глубины надреза и предельных значений коэффициента интенсивности напряжений.

Испытания на сжатие проведены на призматических образцах с размерами поперечного сечения 20x20 мм, высотой 60 мм. Испытания по определению прочности при сжатии проведены при скорости изменения напряжения 1 МПа/с. По экспериментальным диаграммам напряжение-деформация определены модуль упругости и прочность материала. Значения коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии определены по результатам тензометрических измерений деформации в процессе статического нагружения. Начальный участок диаграммы напряжение-деформация при сжатии определялся с применением стандартного экстензометра. Расстояние между щупами экстензометра составляло 30 мм.

Испытания на растяжение исследуемого материала проведены на образцах в виде двойной лопатки. Образцы вырезались из пластин литьевого искусственного камня толщиной 12 мм и размерами 100x200 мм, общая длина образца составляла 200 мм, длина рабочей части 100 мм, ширина рабочей части 10 мм. Ширина концевой части образца, предназначенной для крепления в захватах испытательной

машины, составляла 40 мм. Деформация образца в процессе испытания измерялась с применением стандартного экстензомера, входящего в комплект испытательной машины. Расстояние между щупами экстензомера составляло 50 мм. Монотонные испытания на растяжение проведены при двух скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Вязкость разрушения материала определена в соответствии с методом податливости по результатам испытаний на изгиб образцов–брусков с единичными краевыми надрезами [5]. Длина образцов прямоугольного сечения составляет 120 мм, толщина 10 мм и высота 20 мм. Расстояние между опорами составило 100 мм. Глубина надреза варьировалась на 4-х уровнях и составляла 5, 7,5, 10 и 12 мм. Нагружение образца осуществлялось при скорости увеличения прогиба 0,2 м/с.

Для изготовления образцов использовалась тиксотропная ненасыщенная полиэфирная смола с коротким временем гелеобразования, высокой вязкостью, предускоренная, малой усадкой, низким экзотермическим пиком и малой эмиссией стирола на ортофталевой основе производства фирмы ASHLAND, США. В качестве наполнителя применялись кварцевый песок, мраморная крошка, карбонат кальция и магния, гидроксид алюминия и ряд других материалов. По объему содержание ненасыщенной полиэфирной смолы составляет ~20%, наполнителя применяют не менее 80%. В качестве катализатора, ускоряющего реакцию полимеризации, использовался метилэтилкетон пероксид $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_4$ (активный кислород более 9%) в сочетании с кобальтовым ускорителем (отверждение при комнатной температуре). Содержание катализатора в исходном компаунде составляет 1,5-2%, ускорителя 0,2-2%. В качестве технологических добавок

использовались также красящие пигменты фирмы INCRETE SYSTEMS, США и фирмы BAYER (Германия), общее содержание которых составляло ~0,5-1%.

Для статистической обработки результатов экспериментов были использованы стандартные методы математической статистики по оценке значений измеряемых в ходе экспериментов величин [6]. Кроме того, для построения определяющих соотношений для исследуемого материала использовалось обобщение классической теории упругости – разномодульная теория упругости [7,8].

2. Результаты экспериментов

Растяжение. На рис. 2.1 представлена характерная кривая растяжения исследуемого ЛИК, полученная при постоянной скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ c}^{-1}$. Анализ кривой растяжения дает возможность определить значения предельной деформации, предела прочности как наибольшего значения напряжения и модуля упругости как тангенса угла наклона прямой линии, аппроксимирующей начальный участок диаграммы.

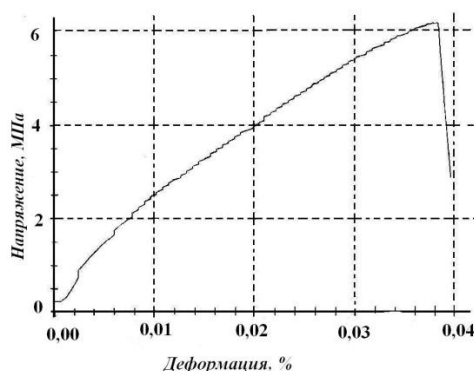


Рис. 2.1. Экспериментальная кривая растяжения ЛИК, полученная при скорости деформации $0,01 \text{ c}^{-1}$

Следует отметить низкий уровень предельной деформации литьевого искусственного камня при растяжении (0,038% - для диаграммы, представленной на

рис. 2.1) и отклонение диаграммы от линейности при нагрузках, близких к предельным. Можно предположить, что снижение сопротивления деформированию материала при высоких уровнях нагрузок обусловлено процессом накопления повреждений в виде нарушения прочности скрепления между полимерной матрицей и частицами наполнителя.

По результатам серии испытаний определены модуль упругости, предел прочности и предельная деформация материала: $\sigma_b = 4,85$ МПа, $\varepsilon_{mp} = 0,0423\%$. Среднее значение модуля упругости указано далее с учетом данных тензометрических измерений.

Использованная модификация установки ZWICK Z100 не оснащена датчиком поперечной деформации. В этой связи, для определения коэффициента Пуассона использован тензометрический метод измерения продольной и поперечной деформации в процессе ступенчатого нагружения образца. При каждом заданном уровне силы производилось измерение деформаций образца с применением цифрового тензоусилителя типа Spider-8.

На рис.2.2 и 2.3 представлены характерные экспериментальные зависимости напряжения и поперечной деформации от продольной деформации, полученные в испытаниях с тензометрированием при растяжении. Зависимость напряжения от продольной деформации позволяет уточнить значения модуля Юнга, полученные по результатам монотонных испытаний с использованием стандартного экстензометра.

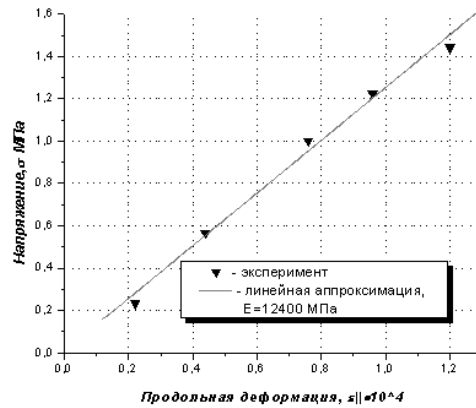


Рис.2.2 Диаграмма растяжения и линейная аппроксимация зависимости напряжения от продольной деформации при тензометрировании

На диаграммах растяжения нанесены прямые линии, полученные как результат линейной аппроксимации экспериментальных данных, определяющей модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемого материала.

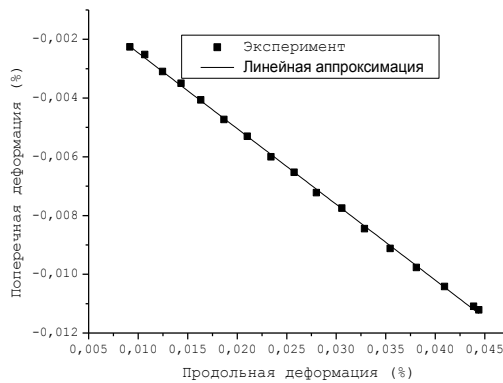


Рис.2.3 Зависимость поперечной деформации от продольной деформации при растяжении, полученная по результатам тензометрических измерений

Из анализа графиков на рис. 2.2 и 2.3, полученных по результатам тензометрических измерений видно, что экспериментальные зависимости удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями, наклоны которых

определяют модуль упругости и коэффициент Пуассона материала с учетом данных, полученных в результате испытаний.

После статистической обработки результатов испытаний [6] на растяжение были получены следующие средние значения предельных характеристик материала:

$\sigma_b = 4,85$ МПа, $\varepsilon_{пр} = 0,0423\%$, при следующих средних квадратических отклонениях этих величин: $S^*(\sigma) = 0,953$ МПа, $S^*(\varepsilon) = 0,0042\%$ и доверительных интервалах этих значений при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $n = 4$ [6, 9]: $\Delta(\sigma) = 1,962$ МПа; $\Delta(\varepsilon) = 0,0086\%$. Среднее значение модуля Юнга $E = 14\,000$ МПа.

Средние значения [6] модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении по данным испытаний тензометрическим способом измерения деформации таковы: $E = 15\,216$ МПа, $\mu = 0,276$.

Для коэффициента Пуассона получены следующие значения среднего квадратического отклонения и доверительного интервала при $P = 0,95$ и $n = 5$: $S^*(\mu) = 0,06$, $\Delta(\mu) = 0,074$.

Статистические оценки для модуля упругости определялись в совокупности с анализом данных на растяжение: среднее значение модуля упругости по результатам испытаний материала по двум методикам составляет: $E = 14\,300$ МПа при среднем квадратичном отклонении $S^*(E) = 2\,602$ МПа и доверительном интервале при $P = 0,95$ и $n = 5$ $\Delta(E) = 5\,339,4$ МПа.

Сжатие. На рис. 2.4 представлена характерная диаграмма напряжение-деформация при сжатии исследуемого ЛИК, полученная при постоянной скорости

изменения напряжения 1МПа/с. По результатам испытаний определены предел прочности, предельная деформация и модуль упругости материала.

На представленной диаграмме следует отметить характерный излом, который делит график на два участка: 1-й участок ($0 < \varepsilon < 0,2\%$) соответствует измерению деформации с применением стандартного экстензометра, 2-й ($0,2\% < \varepsilon < 1,2\%$) - измерению деформации по перемещению активного захвата. Запись диаграммы $\sigma - \varepsilon$ с использованием экстензометра до предельных нагрузок не проводилась из-за опасности повреждения датчика осколками разрушившегося образца. В этой связи оценка предельной деформации получена линейной экстраполяцией начального участка диаграммы на предельное значение силы или напряжения.

Полученный уровень предельной деформации (около 0,5%) существенно превосходит предельное значение относительного удлинения при растяжении (около 0,04%).

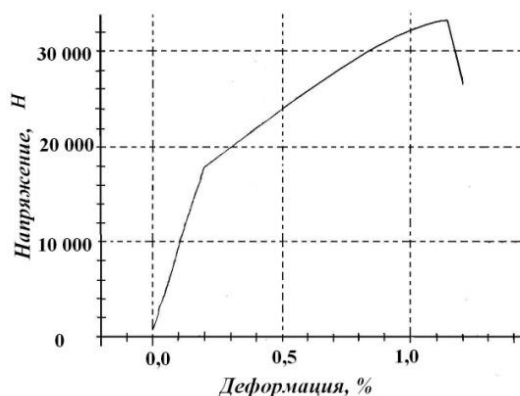


Рис. 2.4 Экспериментальная зависимость напряжений от деформации ЛИК при сжатии, полученная при скорости изменения напряжения 1МПа/с

Определение коэффициента Пуассона при сжатии, как и при растяжении, проведено с использованием тензометрического метода измерения деформации. При этом нагружение образца осуществлялось по ступенчатой программе изменения силы. При каждом заданном уровне силы производилось измерение деформаций образца с применением цифрового тензоусилителя типа Spider-8. На рис. 2.5 и 2.6 приведены зависимости напряжения и поперечной деформации от продольной деформации, полученные в испытаниях с тензометрированием при сжатии. На этих же графиках нанесены прямые линии, полученные как результат линейной аппроксимации экспериментальных данных.

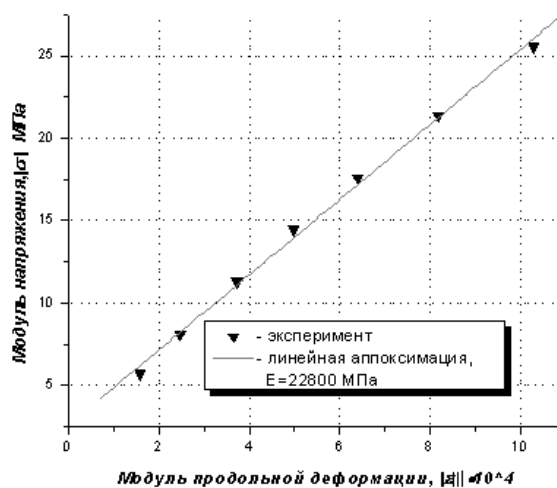


Рис.2.5 Начальный участок диаграммы сжатия. Зависимость напряжения от продольной деформации при тензометрировании

Как видно из представленных данных, экспериментальные зависимости удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями, наклоны которых определяют модуль упругости и коэффициент Пуассона материала с учетом данных, полученных по диаграммам напряжение-деформация.

В результате статистической обработки результатов серии испытаний получены следующие средние значения механических характеристик материала при сжатии: $\sigma_b=74,5$ МПа, $\varepsilon_{пр}=0,374\%$, $E=18\ 900$ МПа при средних квадратических отклонениях этих величин: $S^*(\sigma)=6,35$ МПа, $S^*(\varepsilon)=0,033\%$, $S^*(E)=2\ 437$ МПа. Доверительные интервалы при доверительной вероятности $P=0,95$ и $n=4$ [6,9] таковы: $\Delta(\sigma)=8,82$ МПа, $\Delta(\varepsilon)=0,459\%$, $\Delta(E)=3\ 383$ МПа.

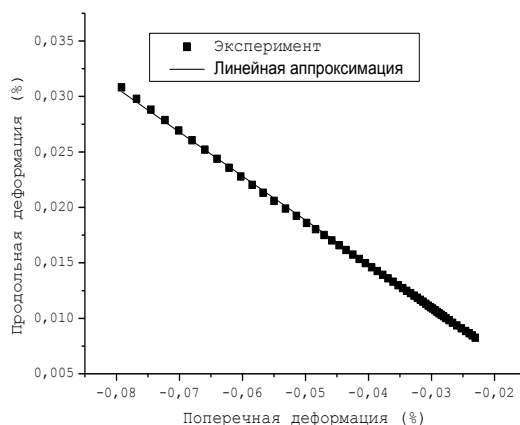


Рис.2.6. Экспериментальная зависимость поперечной деформации от продольной деформации при сжатии, полученная по результатам тензометрических измерений

Средние значения модуля упругости и коэффициента Пуассона в ходе испытаний на сжатие при тензометрическом методе определения продольной и поперечной деформаций имеют следующие значения: $E=21\ 444,97$ МПа, $\mu=0,398$ при средних квадратических отклонениях этих величин $S^*(E)=5\ 571,4$ МПа, $S^*(\mu)=0,0225$. Соответствующие доверительные интервалы при доверительной вероятности $P=0,95$ и $n=5$ [9] таковы: $\Delta(E)=6\ 904,52$ МПа, $\Delta(\mu)=0,0278$.

В работе [10] при численном моделировании процессов гидравлического разрушения горной породы для модуля упругости при сжатии принято $E=42\ 000$ МПа, а для коэффициента Пуассона $\mu=0,25$. В работе [11] для коэффициента Пуассона скальных пород рекомендованы следующие значения $\mu=0,26-0,29$, что удовлетворительно согласуется с данными, представленными в настоящем исследовании.

Характеристики вязкости разрушения. Одной из важнейших характеристик определяющих работоспособность изделий и конструкций из хрупких материалов, является вязкость разрушения, определяющая сопротивление материала к образованию и развитию трещин. Классические теории прочности рассматривают только внешнюю сторону процесса разрушения, но не связаны с внутренними процессами, происходящими в материале до момента разрушения. В исследуемом ЛИК, как и во всех реальных материалах, имеются нарушения структуры в виде дислокаций, пор и трещин. Однако, при рассмотрении процессов деформирования, определении напряжений и характеристик прочности наличие дефектов не мешает считать материал однородным. В данной работе для определения характеристик трещиностойкости исследуемого ЛИК использованы метод податливости для определения интенсивности высвобождения энергии G_{IC} и метод K -тарировки для определения критического значения коэффициента интенсивности напряжений. В соответствии с методом податливости проведена серия испытаний на трехточечный изгиб образцов-брусков прямоугольного сечения с центральными краевыми надрезами [5].

На рис. 2.7 представлены экспериментальные зависимости сосредоточенной силы P от перемещения δ , полученные при испытании образцов с глубиной надреза 5 и 12 мм. Подобные данные использовались для определения экспериментальной зависимости податливости бруса λ от относительной длины трещины (надреза) l/b . Естественной особенностью этой зависимости является то, что податливость возрастает с увеличением глубины надреза и для аппроксимации экспериментальной зависимости возможно использовать монотонную функцию (в работе применялась экспоненциальная функция).

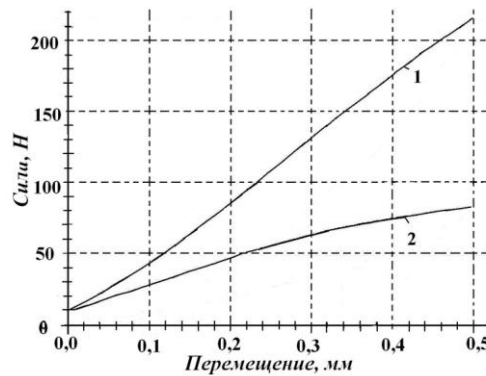


Рис. 2.7 Экспериментальная зависимость сосредоточенной силы P от перемещения δ образцов с различными размерами надрезов: 1- 5мм, 2 - 12 мм

На рис. 2.8 представлена экспериментальная зависимость податливости λ от относительной длины исходной трещины (надреза) l/b .

Полученная зависимость $\lambda(l/b)$ аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью:

$$\lambda(\beta) = 2,12 \cdot 10^{-3} + 9,7448 \cdot 10^{-6} \exp(0,1023\beta), \beta = l/b \quad (2.1)$$

В соответствии с принятой методикой вязкость разрушения определяется по формуле

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2hb} \cdot \frac{d\lambda}{d\beta} \quad (2.2)$$

Значения производной податливости по относительной длине трещины находились по принятой аппроксимации (2.1).

Экспериментальные оценки вязкости разрушения исследуемого ЛИК получены для следующих надрезов: $l=5\text{мм}$ и $l=12\text{ мм}$. Разрушающие нагрузки составляли $P_{кр} = 212\text{Н}$ и $P_{кр} = 83\text{ Н}$ соответственно.

В результате для этих двух вариантов надрезов по формуле (2.2) получены такие значения интенсивности высвобождения энергии:

$$G_{IC} = 110,1\text{ Н/м}, G_{IC} = 57,7\text{ Н/м}.$$

Различия в значениях интенсивности высвобождения энергии для образцов с различной глубиной надреза обусловлены естественным разбросом свойств материала и погрешностями измерений.

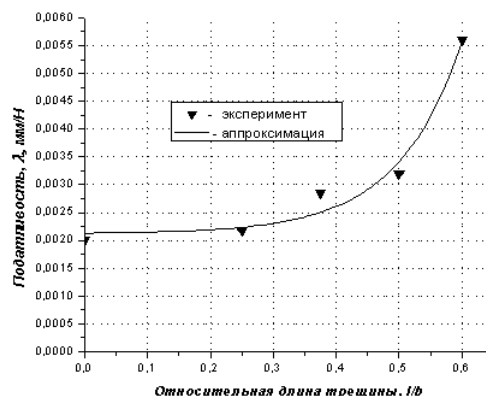


Рис. 2.8. Зависимость податливости λ от относительной длины трещины l/b

Экспериментальные данные, полученные при испытаниях на изгиб образцов с надрезами, позволяют определить другую характеристику трещиностойкости

материала – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} .

Для этого использовался так называемый метод K -тарировки.

В соответствии с этим методом K_{IC} определяется как предельное значение коэффициента интенсивности напряжений при изгибе образца с трещиной с заданными геометрическими размерами [8].

$$\frac{K_{IC}hb^2}{P_{кр}\sqrt{l}} = Y_1(\beta), \quad (2.3)$$

где $P_{кр}$ – предельное значение силы, соответствующее разрушению образца; h и b – высота и толщина образца; l – глубина исходной трещины; $Y_1(\beta)$ – поправочный коэффициент, учитывающий конечные размеры образца.

Для выбранной геометрии образца и схемы испытания функция $Y_1(\beta)$ имеет вид [5]:

$$Y_1(\beta) = 1,0375 - 2,99\beta + 14,3125\beta^2 - 24,8275\beta^3 + 25,655\beta^4$$
$$Y_1(\beta) = A_0 + A_1\beta + A_2\beta^2 + A_3\beta^3 + A_4\beta^4 \quad (2.4)$$

В результате вычислений по формуле (2.3) получены следующие значения K_{IC} исследуемого материала для надрезов глубиной $l=5$ мм и $l=12$ мм:

$$K_{IC}=1,11 \text{ МПа м}^{1/2} \text{ и } K_{IC} = 1,1 \text{ МПа м}^{1/2}.$$

Соотношения линейной механики разрушения, использованные для оценки сопротивления хрупкого разрушения образцов из рассматриваемого ЛИК, позволяют вычислить интенсивность высвобождения энергии G_{IC} по известным значениям K_{IC} и упругим характеристикам материала.

Для выбранной схемы испытаний $k = 1 - \mu^2$. С использованием полученных в работе значений K_{IC} и упругих характеристик материала ($E = 14\,300$ МПа, $\mu = 0,276$) расчетные значения G_{IC} для указанных двух надрезов таковы:

$$G_{IC} = 77,1 \text{ Н/м и } G_{IC} = 63,8 \text{ Н/м,}$$

что удовлетворительно согласуется со значениями, полученными при использовании метода податливости.

В работе [12] приведены следующие характеристики натурального гранита: $K_{IC} = 1,08 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, предел прочности при растяжении $\sigma_B = 19,5 \text{ МПа}$. Следует отметить, что вязкость разрушения ЛИК практически совпадает с этой характеристикой для гранита. Данные по прочности натурального материала несколько отличаются от данных для ЛИК, представленных в настоящей работе. Тем не менее, следует отметить, что для натуральных пород (в том числе и для гранита) имеет место большой разброс величин механических характеристик. Так в работе [13] значения модуля упругости для гранита приведены в пределах от 35 000 МПа до 100 000 МПа. Характеристики натурального гранита зависят от многих факторов, например, от месторождения данного камня, от глубины залегания, геологического строения массива и проч.

3. Разномодульность литьевого искусственного камня и идентификация модели, описывающей влияние вида напряженного состояния на свойства материала

Проведенные экспериментальные исследования по определению механических характеристик показали, что ЛИК имеет различные значения упругих механических характеристик исследуемого материала при растяжении и сжатии

(см. п. 2). Таким образом, можно говорить о том, что литевой искусственный камень можно отнести к материалам, чувствительным к виду напряженного состояния – разномодульным материалам [8].

Из анализа существующих теорий разномодульных материалов можно сделать вывод, что наиболее подходящей для описания напряженно-деформируемого состояния литевого искусственного камня будут соотношения предложенные в [7].

Определяющие соотношения основаны на обобщении классического упругого потенциала, характеризующего зависимость свойств материала от вида напряженного состояния [7, 8].

Если исходить из потенциала работы деформации, то в качестве параметра, характеризующего вид напряженного состояния, следует взять отношение среднего напряжения к интенсивности напряжений. Выражение для потенциала должно включать в себя как частный случай потенциал для классического упругого тела, который можно записать в виде

$$\Phi = \frac{1}{2} [1 + \zeta(\xi)] (A + B\xi^2) \sigma_0^2, \quad \xi = \frac{\sigma}{\sigma_0}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}; \quad \sigma_0 = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2} \quad (3.1)$$

где σ - среднее напряжение, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; δ_{ij} - символ Кронекера; σ_0 - интенсивность напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij} \delta_{ij}$ - компоненты девиатора напряжений; A и B - постоянные материала; функция $\zeta(\xi)$ определяет свойства материала.

Отметим, что при $\zeta(\xi) = 0$ потенциал (3.1) совпадает с потенциалом для классического упругого тела.

Из (3.1) вытекает следующая зависимость между деформациями ε_{ij} и напряжениями:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} = \varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \omega(\xi) s_{ij} + \frac{1}{3} \Omega(\xi) \sigma \delta_{ij} \quad (3.2)$$

где
$$\omega(\xi) = -\frac{1}{2} \zeta'(\xi)(A + B\xi^2)\xi + A(1 + \zeta(\xi)),$$

$$\Omega(\xi) = \frac{1}{2\xi} \zeta'(\xi)(A + B\xi^2) + B(1 + \zeta(\xi)).$$

Далее принимаем

$$\zeta(\xi) = C\xi \quad (3.3)$$

В работе [7] показано, что подобное упрощение приемлемо для многих практических задач по оценке напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из разномодульных материалов.

Функции $\omega(\xi)$ и $\Omega(\xi)$ в этом случае принимают вид:

$$\omega(\xi) = -\frac{1}{2} \xi(A + B\xi^2)C + A(1 + C\xi) \quad (3.4)$$

$$\Omega(\xi) = \frac{1}{2\xi} (A + B\xi^2)C + B(1 + C\xi) \quad (3.5)$$

Для идентификации постоянного материала используем результаты измерений продольной и поперечной деформации в испытаниях на растяжение и сжатие.

Для одноосного растяжения можно записать:

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_1, \quad \sigma_0 = \sigma_1, \quad \xi = \frac{1}{3}, \quad s_{11} = \frac{2}{3} \sigma_1, \quad s_{22} = s_{33} = -\frac{1}{3} \sigma_1,$$

где σ_1 - растягивающее напряжение, задаваемое в эксперименте.

Далее после подстановки параметров нагружения в (3.2)-(3.5) из соотношений для компонент тензора деформаций получаем два уравнения для определения постоянных материала:

$$\frac{1}{E^+} = A\left(1 + \frac{1}{3}C\right) + \frac{1}{9}\left(1 + \frac{1}{3}C\right); \quad (3.6)$$

$$\frac{\mu^+}{E^+} = -\frac{1}{4}\left(A + \frac{1}{9}B\right) + \frac{1}{2}A\left(1 + \frac{1}{3}C\right) + \frac{1}{9}B\left(1 + \frac{1}{3}C\right), \quad (3.7)$$

где E^+ и μ^+ - экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента, полученные в испытаниях на растяжение.

Для случая одноосного сжатия для параметров нагружения справедливы следующие соотношения:

$$\sigma = -\frac{1}{3}\sigma_1, \quad \xi = -\frac{1}{3}, \quad s_{11} = -\frac{2}{3}\sigma_1, \quad s_{22} = s_{33} = \frac{1}{3}\sigma_1,$$

где σ_1 - абсолютное значение сжимающего напряжения.

Подстановка параметров нагружения в (3.2)-(3.5) и анализ соотношений для продольной и поперечной деформации приводит ко второй паре уравнений для определения постоянных материала:

$$\frac{1}{E^-} = A\left(1 - \frac{1}{3}C\right) + \frac{1}{9}B\left(1 - \frac{1}{3}C\right); \quad (3.8)$$

$$\frac{\mu^-}{E^-} = \frac{1}{4}\left(A + \frac{1}{9}B\right) + \frac{1}{2}A\left(1 - \frac{1}{3}C\right) - \frac{1}{9}B\left(1 - \frac{1}{3}C\right), \quad (3.9)$$

где E^- и μ^- - экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, полученные в испытаниях на сжатие.

Уравнения (3.6) – (3.9) позволяют найти постоянные A , B , C . При этом необходимо учитывать, что величины μ^+ , μ^- , E^+ , E^- должны быть связаны между собой равенством [7]:

$$\frac{\mu^+}{E^+} = \frac{\mu^-}{E^-} \quad (3.10)$$

Найденные экспериментальные величины модулей упругости и коэффициентов Пуассона ($E^+ = 14\,300$ МПа, $\mu^+ = 0,276$, $E^- = 21\,445$ МПа, $\mu^- = 0,398$) показывают, что это равенство приближенно выполняется. Это дает возможность исключить из системы (3.6) – (3.9) одно уравнение. Решение системы из трех уравнений (3.6), (3.8) и (3.9) приводит к следующему результату.

$$A = 4,661 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$$

$$B = 8,612 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$$

$$C = 0,51.$$

ВЫВОДЫ.

По результатам механических испытаний с использованием современного измерительного оборудования впервые определены упругие характеристики нового класса зернистых композитов на основе ненасыщенных полиэфиров – литьевого искусственного камня. Значения упругих характеристик, полученных с использованием стандартного датчика силы и экстензометра, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными при использовании тензометрического метода измерения деформации в процессе нагружения образца растягивающей и сжимающей силой. Методами податливости и К-тарировки получены экспериментальные значения характеристик вязкости разрушения

исследуемого материала: интенсивности высвобождения энергии, G_{1C} и критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{1C} .

Разработаны методики определения механических свойств литьевого искусственного камня, определены оптимальные формы и размеры образцов для испытания подобных материалов на растяжение, сжатие и трещиностойкость.

Полученные значения механических характеристик материала сопоставимы с аналогичными характеристиками натурального камня.

Показано, что свойства материала существенно зависят от вида напряженного состояния. Разработана методика определения параметров определяющих соотношений, принятых для описания установленной зависимости упругих характеристик от вида напряженного состояния. Полученные значения параметров определяющих соотношений позволят решать широкий спектр задач по определению напряженно-деформированного состояния и работоспособности изделий из литьевого искусственного камня.

Библиографический список

1. Мэтьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. - М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
2. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И. Особенности и преимущества использования литьевого искусственного камня // Материалы X международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». Том 1. Москва, 2004. С.145-146.

3. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Особенности производства изделий из литьевого искусственного камня// Материалы XIII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». Москва, 2007. С. 156-165.
4. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И. Перспективы развития технологии производства изделий из литьевого искусственного камня // Тезисы докладов международной научной конференции «XXX Гагаринские чтения». Том 1. Москва, МАТИ, 2004. С.16-17.
5. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. - М.: Мир, 1972. – 246 с.
6. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное пособие. - М.: Наука, 1971. - 192 с.
7. Ломакин Е.В. Определяющие соотношения механики разномодульных материалов. Препринт № 159. - М.: ИПМ АН СССР, 1980. – 64 с.
8. Ломакин Е.В. Разномодульность композитных материалов // Механика композитных материалов. 1981. № 1. С. 23-29.
9. Лосев С.А. О свертке информации, получаемой в экспериментах на ударных трубах // Научные труды НИИ механики МГУ. 1973. №21. С.3-21.
10. Uchigata M.,Itaoka M., Sato K., Hashida T. Numerical Simulation of Propagation with Shear Slip Induced by Hydraulic Fracturing. Nihon kikai gakkai ronbunshu. A Trans. Jap. Spc. Mech. Engl.A.- 2006.-V.72, №716. P. 419-424.

11. Спивак А.И., Попов А.Н. Механика горных пород. - М.: Недра, 1975. -200 с.
12. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Смирнов В.И., Кривошеев С.И. Прогнозирование динамической вязкости разрушения горных пород // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород. Сборник статей к 75-летию Е.И. Шемякина. 2006. С.484-496.
13. Абрамсон М.Г., Байдюк Б.В., Зарецкий В.С. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. - М.: Недра, 1984. - 207 с.
14. Дудченко А.А., Кыонг Л.К., Лурье С.А. Расчет и проектирование контурно подкрепленной композитной панели, нагруженной поперечной силой // Труды МАИ, 2012, №50: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28792>
15. Гетманов А.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевого сплава // Труды МАИ, 2014, №72: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47334>